跑鞋与触地模式的生物力学及其与损伤关系研究进展

肖松林,孙晓乐,杨洋,于常晓,张希妮,傅维杰

(上海体育学院运动健身科技省部共建教育部重点实验室, 200438 上海)

摘　要:现今各种性能的跑鞋逐渐发展,跑鞋科技不断进步,但跑步导致的下肢损伤率依然居高不下。无论是传统跑鞋(运动控制鞋、缓冲鞋、中性稳定鞋),还是近年来再度流行起来的极简鞋,能否降低损伤发生率、提高运动表现仍存在较大争议。本研究针对不同的跑鞋进行分类梳理,总结不同跑鞋下的生物力学模式及其对下肢损伤的影响。研究表明:根据脚型定制的传统缓冲跑鞋并不会减少损伤发生率;极简鞋具有减少关节扭矩和髌骨接触应力、强化足内在肌和跟腱力学特性等优势,建议穿着极简鞋跑步采用循序渐进的转化方式,尽量配合下肢、足踝肌群的强化练习,如足核心训练。未来的研究应着重关注跑鞋与下肢损伤的内在生物力学机制,为减小和预防下肢损伤提供理论依据,并为跑者选择适合自身的跑鞋提供更具建设性的意见。

关键词:跑鞋;裸足跑;极简鞋;下肢损伤;生物力学

中图分类号:G804.2　　**文献标志码:**A

Progress in research on biomechanics of footwear and foot strike patterns and its relationship with running injuries

XIAO Songlin, SUN Xiaole, YANG Yang, YU Changxiao, ZHANG Xini, FU Weijie

(Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education,
School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, 200438 Shanghai, China)

Abstract: Nowadays, with the development of various running shoes and the progress in running shoe technology, the incidence of running injury still remains high. Whether traditional running shoes (motion control shoes, cushioning shoes, and neutral stabilizers) or minimalist shoes, which have made a comeback in recent years, can reduce injury rates and improve athletic performance still remains a great controversy. This paper classifies different running shoes and reviews the effects of footwear biomechanics. The aim of the review is to summarize the biomechanical mechanisms of different footwear and its effects on lower extremity injuries and performance in order to provide suggestions on running shoes selection and prevent/reduce the risk of running-related injuries. Studies have shown that even customizing traditional cushioning shoes to fit the foot type does not reduce the incidence of running-related injuries. Minimalist shoes have

收稿日期:2022-01-30　　**修回日期:**2022-03-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11772201;11932013);国家重点研发计划“科技冬奥”重点专项(No. 2019YFF0302100);上海市“曙光学者”计划(No. 19SG47);上海市青年拔尖人才开发计划

通信作者:傅维杰,教授,E-mail:fuweijie@ sus. edu. cn;张希妮,E-mail:zhangxini1129@ 163. com

引用格式:肖松林,孙晓乐,杨洋,等. 跑鞋与触地模式的生物力学及其与损伤关系研究进展[J]. 应用力学学报,2022,39(2):201-208.
XIAO Songlin, SUN Xiaole, YANG Yang, et al. Progress in research on biomechanics of footwear and foot strike patterns and its relationship with running injuries[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(2):201-208.

the advantages of reducing joint torque and patella contact stress and strengthening the mechanical properties of intrinsic foot muscles and Achilles tendons. One suggestion is that it is necessary to perform the gradual transformation project and try to coordinate with the strengthening exercises of lower limb muscles, such as foot core exercise. Future studies should focus on the underlying biomechanical mechanisms of running shoes and lower limb injury, which can provide theoretical basis for reducing and preventing lower limb injuries and offer more suggestions for runners to choose their own running shoes.

Key words: running shoes; barefoot running; minimal shoes; running-related injury; biomechanics

进化学证据表明,人类大约在两百万年前便开始跑步活动[1]。现代人类为适应双足奔跑使部分结构发生适应性变化,如内侧纵弓和跟腱等。此外,每只正常足有26块骨、33个关节,每个关节都具有若干个运动自由度,以适应足部的多种运动功能需求。然而,人体足部在适应步行和奔跑的过程中需要现代鞋类的辅助。

第一双跑鞋诞生于1895年,并在随后的一百多年间从早期的极简跑鞋到具有足弓支撑和高缓冲性能的跑鞋,两者交替流行。随着跑步运动的流行,由于跑步所导致的损伤并没有因为跑鞋技术的发展而降低[2]。近年的研究表明,跑步导致的下肢损伤率从19.4%增加到79.3%,且主要以膝关节损伤为主,发生率为7.2% ~50%[3]。此外,跟腱病、足底筋膜炎、胫骨应力综合征、髌骨疼痛综合征等也是常见的跑步损伤[4]。虽然已经有不少研究者建议跑者选择适合自己的跑鞋或改变触地模式以减小跑步损伤风险。但是如何调整跑步姿态,如何选择合适的跑鞋,甚至是否应该回归裸足跑等问题仍未明确。

因此,本研究针对不同的跑鞋进行分类,并以其生物力学影响为依据展开综述,重新考量跑鞋在人体跑步中的作用,探究足触地的生物力学模式与鞋类的相互关系,同时为该研究领域的发展提供方向。

1 跑鞋与下肢生物力学

随着跑步运动的流行,跑鞋得到快速发展。现今,跑鞋主要分为传统跑鞋、极简鞋两大类。其中,基于不同足型设计和具体作用,传统跑鞋主要包括运动控制鞋、缓冲鞋、中性稳定鞋;基于极简指数的差异,极简鞋主要包括半极简鞋、全极简鞋。穿着上述不同跑鞋跑步的下肢生物力学模式存在显著差异。

1.1 传统跑鞋与下肢生物力学

目前,传统跑鞋主要包括运动控制鞋、缓冲鞋和中性稳定鞋。跑鞋早期的发展主要是为了应对20世纪70年代早期跑步损伤的增加。足踝运动医学专家认为过度的足外翻(pronation)和重复的冲击力是导致足部损伤的重要原因,因此,具有控制足外翻以及减震功能的运动控制鞋和缓冲鞋得到发展。此后,中性稳定鞋(neutral stabilizer)逐渐成为第三大类传统跑鞋。

一般跑鞋具有22 mm ~24 mm的中底厚度和10 mm ~12 mm的前后跟落差(足跟和足跖间的高度差)[2]。然而,运动控制鞋和缓冲鞋、中性稳定鞋的结构特点不同。运动控制鞋主要用于支撑和控制足部,并且针对过度足外翻的扁平足个体。因此,其通常由坚硬的足跟稳定结构组成,牢固地支撑足弓。与中性或缓冲鞋相比,这类鞋刚度和质量更大。缓冲鞋主要用于辅助减震,特别针对过度旋后的高弓足个体,该鞋整体采用低密度中底构造,更轻、更灵活。中性稳定鞋则介于运动控制鞋和缓冲鞋之间,具有两者的一些特性。

已有相关生物力学研究探究上述跑鞋是否具有其描述的功能。Langley 等[5]发现,相比于中性稳定鞋,运动控制鞋显著降低后足外翻角度。另外Fischer 等也证实了此点,且疲劳条件下,穿着中性稳定鞋时外翻增加,但是穿着运动控制鞋时外翻减小[6]。

这3类跑鞋是针对不同的足结构和功能而设计的,尽管厂商宣称适合自身足弓的跑鞋可以降低损伤发生率,但生物力学研究表明,在足弓类型与鞋型没有显著相关性的情况下,跑鞋不会对损伤率产生影响,原因可能是足弓高度、足关节活动度和后足运动之间的关系是复杂多变的[7]。因此,未来还需进一步探究足型和鞋型之间的内在联系。

1.2 裸足跑与下肢生物力学

裸足跑是人类最自然的跑步方式,虽然自20世纪60年代以来,已经有跑者尝试裸足跑,但真正使

裸足跑再次引起人们关注的是 McDougall 的《Born to Run》这本书的问世。裸足跑者认为,跑步时不穿跑鞋可以提供重要的感官输入,可以让足部在跑步的过程中发挥作用[8]。而反对裸足跑的人认为,足部需要额外的缓冲和支撑以维持跑步时受到的重复性负荷[9]。有意思的是,双方都认为各自的方法可以减小跑步损伤。

相比于着传统跑鞋跑步,裸足跑可以致使垂直冲击力峰值减小或者消失,同时垂直负载率亦较小;支撑相早期,裸足跑可以减少垂直和侧向地面反作用力,同时减小足外翻角度。另外,当足跟抬起,鞋外侧楔离地时,距离垂直和侧向力的力臂减少(图1)[10]。随着垂直和侧向力及其力臂的减少,裸足跑时足部的外翻力矩减少。实际上,Bonacci 等[11]研究发现,与穿着传统跑鞋跑步时相比,裸足跑时足后跟外翻角会显著减小,而足后跟的过度外翻与胫骨应力综合征、胫后肌腱功能紊乱有关[9]。因此,减小足后跟外翻的角度可以降低相关损伤风险。

垂直地面反作用力
侧向地面反作用力
(a) 穿鞋跑
垂直地面反作用力
侧向地面反作用力
(b) 裸足跑

图 1 穿鞋跑与裸足跑时的后足外翻力矩比较示意图
Fig. 1 Comparison of hindfoot valgus torque between shod running and barefoot running

值得注意的是,裸足跑会提升跟腱负荷,较高的负荷结合较快的拉伸速度,会增加肌肉-肌腱单元刚度,这有益于跟腱整体的健康[12]。研究显示,运动员跳跃腿的跟腱具有更高的机械性能(刚度)和材料特性(杨氏模量)[13]。另一项研究显示,不同触地模式跑者(12 名前掌触地、12 名足中部触地、17 名后跟触地)的跟腱特性没有显著差别[14]。一项相关性研究发现,与习惯穿着传统跑鞋的跑者相比,习惯穿极简跑鞋的跑者跟腱刚度更大[15],可能是由于触地模式的改变造成跟骨和跟腱承受更大的负荷导致更大的跟腱刚度。虽然在此项研究中没有量化触地模式,但是其他研究显示,穿着极简跑鞋跑步时触地模式确实更靠近足部前侧[16]。这项相关性研究的局限性在于,穿着不同跑鞋时会采用不同的触地模式,因此无法证明是鞋条件本身还是跑鞋与触地模式的交互作用导致跟腱特性的变化。随后,该团队进行了一项前瞻性研究,要求受试者在前掌触地模式的指导下,从传统跑鞋过渡至极简跑鞋,其结果与横断面研究一致,经过 6 个月干预后,受试者跟腱更强壮、刚度更大[17]。此外,裸足跑的另一个优点是可以显著减少髌骨接触应力,这主要是由于较小的垂直力和较大的接触面积(膝关节屈曲角度更大)[18]。作为最常见的跑步损伤,髌骨痛的主要原因是较高的接触应力。

除此之外,裸足跑时的感官输入可以帮助控制身体姿态。已有研究证明,相比于不穿袜子,仅通过穿着一双薄袜就可以显著促进人体动态姿势控制[19]。此外,来自足部的感觉系统可以通过足部所接触的地面情况,提供重要信息以调节腿的刚度。例如,与穿着缓冲鞋相比,裸足跑时的刚度更小、顺应性(compliance)更高[20]。顺应性更高的落地模式会降低对肌骨系统的冲击负载率。裸足的另一个优点是可以增强附着足弓上的肌肉力量[21]。就足部而言,长期负重支撑会导致肌肉弱化,也会导致足弓结构的弱化。一项针对儿童足型的研究发现,在童年早期穿着束缚过紧的鞋可能会对足部纵弓产生不利影响[22]。

1.3 极简鞋与下肢生物力学

虽然裸足跑有诸多益处,但当前社会人类需要穿鞋进行大部分日常活动,以保护足部免受环境的伤害,如粗糙的地面、极冷或极热的天气。因此,理想的鞋具需要在提供保护作用的同时尽可能接近裸足状态。



图 2 上个世纪 70 年代马拉松跑鞋(左)[23]、五指极简鞋(中)和半极简鞋(右)
Fig. 2 Marathon running shoes[23] in the 1970s, five-finger minimalist shoe, and semi-minimalist shoe

最初跑鞋只有简单的外底,包裹着足部(图 2 左)。在之后的 40 年里,跑鞋逐渐发展成更具支撑和缓冲性能特征,然而随着 2009 年裸足跑的盛行,极简鞋重新得到关注。市面上第一款极简鞋是五指鞋(图 2 中),跑者很快就采用这种鞋型。此后,其他

鞋类品牌也推出极简鞋，具有以下特点：外底极易弯折，可卷成球状；无足弓支持和中底（无前后跟差）；鞋跟易弯曲。因此极简鞋既无支持作用也无缓冲作用，正因其无中底，只有在外底磨损后才需更换鞋。

穿着极简鞋跑步可以减少关节扭矩和髌骨接触应力并且加强足部力量[24]，这些因素能够减小损伤发生率。另外，有研究比较了裸足跑与其他鞋条件在跑步经济性上的差异，研究发现：与传统跑鞋相比，裸足跑或穿着极简鞋跑步可以提高跑步经济性，且裸足跑和极简鞋的跑步经济性相似[25]。

随着时间推移，半极简鞋开始进入市场，它们与传统跑鞋相比具有较少的缓冲结构（结构厚度通常为 11 mm ~ 22 mm），足弓支撑及前后跟差（通常为 4 mm ~ 8 mm）（图 2 右）。根据鞋结构和材料等特征属性计算得到的极简指数，研究人员将鞋从极缓冲鞋到全极简鞋按 0%（极缓冲鞋）至 100%（全极简鞋）进行分类，这些新出现的半极简鞋的等级介于 50% ~ 100% 之间，即介于全极简鞋与传统跑鞋之间的折中物[26]。

然而需要注意的是，是否所有类型的极简跑鞋都可模仿裸足跑。Bonacci 等[11]比较了两种半极简鞋、传统跑鞋与裸足跑的生物力学差异。结果发现：穿着半极简鞋与传统跑鞋时膝关节、踝关节的运动学和动力学参数没有差异，而与裸足跑时的运动表现却有显著不同；与穿着鞋跑相比，裸足跑膝关节屈曲角度在支撑相中期显著减小，伸膝力矩和外展力矩峰值减小 11%，膝关节处做功减小 24%；同时，踝关节刚触地时背屈角度减小，峰值能量减小 14%，做功增加 19%，这可能是由于半极简鞋中底的缓冲促使跑者更倾向于后跟触地模式。Squadrone 等[27]进一步比较了裸足跑、传统跑鞋、半极简鞋、全极简鞋等 6 种跑鞋。所有受试者都是习惯穿极简鞋的跑者。研究结果表明：两种全极简鞋与裸足跑生物力学模式最相近，而传统跑鞋与裸足跑模式差异最大；当鞋的缓冲性能越好，生物力学性质就越接近于传统跑鞋。以上两个研究表明，缓冲性能会显著影响跑者的触地模式和步态的时空特征，穿全极简鞋是裸足跑者的更优选择。Rice 等[28]的一项研究也支持此观点，其研究结果表明，当穿着传统跑鞋时，不同跑姿下的负载率峰值以及各方向上的瞬时负载率没有差异，而穿着全极简鞋采用前掌触地模式时，其负载率会显著减小。因此，即使是相似的跑姿，鞋条件本身对跑步时改变负载率也起到重要作用。

2 跑鞋与跑步触地模式生物力学

跑步时脚与地面接触呈现 3 种模式：后跟触地、足中部触地、脚前掌触地模式。一般而言，大约 90% 的跑者采用后跟触地模式进行跑步，即跑步着地时脚后跟先接触地面，着地初期地面反作用力曲线显示一个明显的瞬时冲击力（图 3）；另外，跑者中有 1% 采用前掌跖球部触地模式进行跑步，这类跑者称为前掌触地跑者，前掌触地模式与瞬时冲击力无关，因此其垂直负载率显著小于后跟触地；剩余 10% 的跑者习惯足中部触地，触地产生的垂直地面反作用力值介于后跟触地和前掌触地跑者之间[29]。

穿着传统跑鞋跑步与裸足跑和穿着极简鞋跑步最显著的差别在于触地模式不同。穿着传统跑鞋时，跑者通常采用后跟触地模式，这是由于传统跑鞋存在一个较厚的后跟，落地时足部呈背屈 5°左右状态，跑者可以较为舒适地进行后跟着地缓冲。裸足跑时，由于后跟触地会造成一定的疼痛感，因此大部分裸足跑者跑步时会采用前掌触地模式，然而人体的足跟垫可以适应性地减小行走时的负荷，但不会减小跑步时的负荷[30]。因此极简鞋开始流行起来，其主要目的就是模仿裸足跑。穿着极简鞋与裸足时的生物力学模式类似，由于极简鞋无任何缓冲结构，后跟触地时舒适性较差，因此促使跑者采用前掌触地模式。另外，Squadrone 等[27]比较 8 种鞋条件下（裸足、极简鞋和传统跑鞋等）的跑步生物力学，发现对于习惯穿着传统跑鞋的跑者而言，足-地界面的变化可能导致跑步触地模式的改变，而极简鞋可以有效地模拟裸足跑，但需要循序渐进的转化过程。

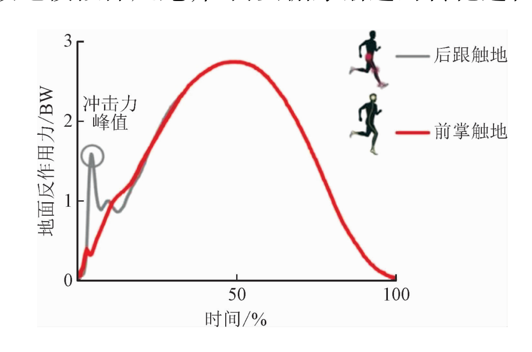


图 3　后跟触地和前掌触地模式的地面反作用曲线
Fig. 3　The curves of ground reaction forces during rearfoot and forefoot patterns

值得注意的是，在跑步的过程中，跑鞋和触地模式是相互作用的。前人研究发现，相比于裸足前掌

触地模式跑步时，穿着传统跑鞋前脚掌触地时踝关节会更容易跖屈，这可能是传统跑鞋的高后跟结构导致跑步触地模式改变所造成的，而在进一步对比穿着极简鞋前掌跑时，穿着传统跑鞋反映出的负荷率较高[28]。Davis 等[31]深入比较习惯穿着全极简鞋和半极简鞋的跑者前掌触地跑步生物力学，结果发现：相比穿着半极简鞋，习惯穿着全极简鞋前掌触地跑者负载率降低约 17%。上述结果强调不同跑鞋与触地模式对下肢生物力学的影响，并表明跑鞋的任何减震结构都会影响下肢生物力学。未来研究应尝试厘清跑鞋与触地模式之间相互作用关系。

3 跑鞋与下肢损伤

据统计，每年高达 79% 的跑者遭受损伤，损伤病因是多因素的，其中，在跑步发展进程中一个重要变化因素就是跑鞋，具有支撑、缓冲作用的跑鞋能够为跑者提供保护作用。然而，现代跑鞋诞生以来，跑步运动损伤并没有呈现下降趋势[2]。事实上跑鞋与下肢损伤之间的关系十分复杂，不同跑鞋条件下，跑者所表现出来的生物力学特征与损伤风险密不可分，通过生物力学分析可以建立跑步下肢损伤与跑鞋生物力学各参数之间的内在联系。

3.1 传统跑鞋与下肢损伤

依据足型和力学设计跑鞋的主要目的是降低损伤风险，然而临床的结果却大相径庭。Knapik 等[32]依据受试者自身的足型选择跑鞋，其中试验组具有扁平、足外翻特征足型的受试者穿着运动控制鞋，具有高足弓、旋后特征足型的受试者穿着缓冲鞋，正常足弓受试者穿着中性稳定鞋；对照组不论足型特征全部穿着中性稳定鞋。在干预训练过程中监控受伤情况，结果发现根据足型而选择跑鞋对受伤情况没有影响。另外，Ryan 等[33]还探究了根据足型指数匹配跑鞋与足型的关系，将受试者的足型分为正常足、中等外翻足和严重外翻足，随机分发给受试者运动控制鞋、中性稳定鞋或缓冲鞋。总体而言，运动控制鞋导致受伤缺勤的天数最多，中性稳定鞋导致受伤缺勤的天数最少。该研究表明，正常足和外翻足的跑者穿着运动控制鞋可能会增加跑步相关疼痛风险。关于缓冲鞋，Theisen 等[34]发现鞋中底密度对跑步损伤风险没有影响。综上，前人研究更倾向于将中性稳定鞋作为传统跑鞋中的最佳选择。

3.2 极简鞋与下肢损伤

在穿着极简鞋跑步时，前掌触地模式对小腿三头肌和跟腱的力量要求增加，同时也对足内、外在肌力要求增加[35]。足底肌肉对于它们所支撑的骨骼应变曲线是至关重要的，而足部肌肉组织的弱化会使跖骨损伤的风险加大。因此，转换至穿极简鞋跑步的过程要循序渐进，使得肌骨系统有充足的时间去适应。同时，核磁结果显示，逐渐转化到穿着极简鞋跑步能使足内、外肌肉加强[36]。

关于极简鞋损伤风险的研究均认为损伤与过快的转换有关。有研究报告有关 10 例由于过快地从传统跑鞋转换为极简鞋而造成足部损伤（跖骨应力性骨折、跟骨应力性骨折、足底筋膜炎），这 10 例转换到全程穿着极简跑鞋跑步的平均时间是 3 周[37]。Ryan 等[38]研究随机将 99 名运动员分为全极简鞋组、半极简鞋组和传统跑鞋组，在 12 周的训练期间逐渐加大跑步强度，同时关注运动员的损伤情况。结果发现，12 周训练后，全极简鞋组和半极简鞋组的损伤率均高于传统跑鞋组，其损伤风险（relative risk，RR）分别为 160% 和 310%。此前研究认为，穿着半极简鞋的跑者足跟缓冲相比传统跑鞋减小，因此控制足跟触地冲击的能力减弱，导致损伤率升高。而在穿着全极简鞋的跑者中，出现小腿和跟腱疼痛的情况更多[11]。这提示跑鞋转换方案可能需要配合相应的强化练习来改善小腿和跟腱的力学特性。

建议在尽量避免损伤的情况下，逐渐转换为穿着极简鞋并采用前掌触地模式，通过强化练习加强某些重要肌群承受额外负载的能力，有助于促进跑姿转换过程[39-40]。这些肌群包括下肢后侧肌肉和足内在肌（intrinsic foot muscle）。现阶段，可以通过足核心训练（foot core exercise）强化足内、外在肌，并作为辅助跑姿转换训练避免损伤的有效手段。本团队最新的研究表明：12 周穿着极简鞋跑姿转换配合足核心训练可以提高足内在肌力量，改善站立时的足弓形态，并显著减小后跟着地跑时的足弓最大压缩角度、提高着地瞬间的足弓高度和足弓高度变化量，且在干预过程中未发现与训练直接相关的损伤[41]。足核心训练主要包括短足训练（short foot exercise）、分趾训练、卷毛巾训练、提踵训练等一系列强化足部肌肉力量的训练方式[42]。其中，短足训练要求受试者尽可能收紧足内在肌，发力意图为将跖趾关节沿着地面拉向足跟处，提高足弓高度（图 4a）；分趾训

练要求受试者尽最大可能伸展分离足趾并维持一定时间(图4b);卷毛巾训练要求受试者屈曲足趾将毛巾拉向受试者一侧(图4c);提踵训练要求受试者站立时将脚跟向上抬起,使身体的重量落在前脚掌上,可从双脚提踵进阶到单脚提踵(图4d)。

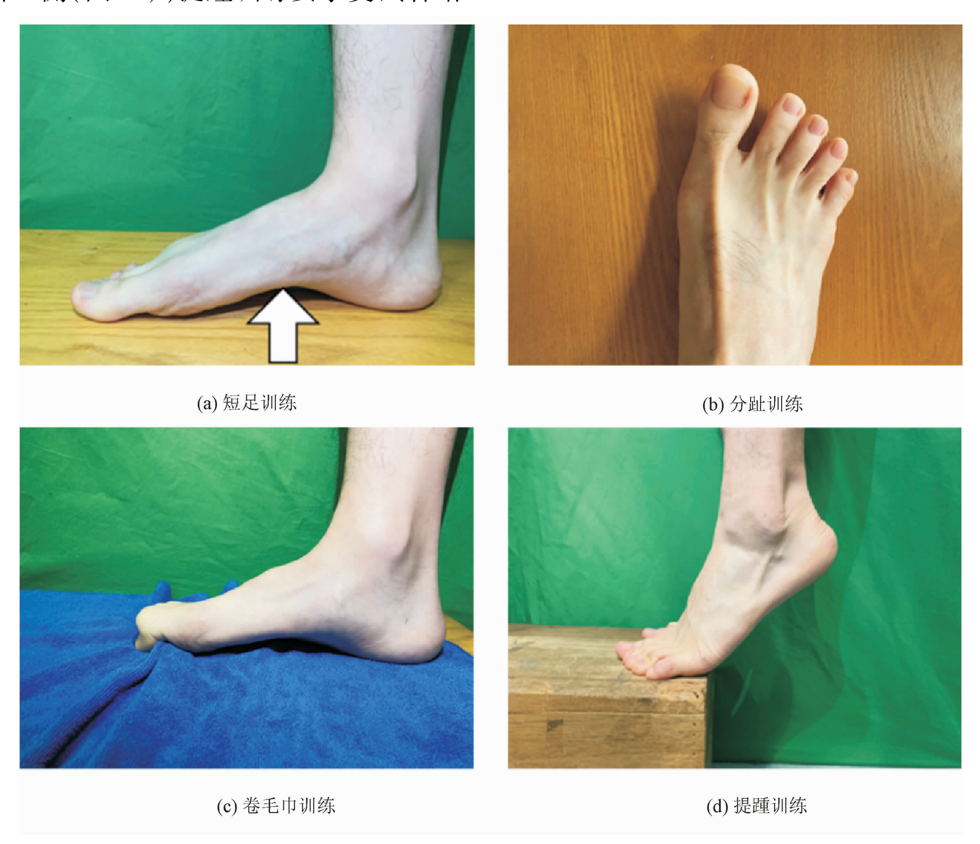


图4　足核心训练

Fig. 4　Foot core exercise

4 总结与展望

跑鞋在过去的百年间经历了从简单的硬底鞋到具有更强大支撑功能的缓冲跑鞋的交替流行。绝大部分跑者认为额外的支撑和缓冲功能能使跑步更加安全有效。然而,大量研究表明,根据脚型定制的缓冲跑鞋并不会减小损伤发生率。近年来,由于极简鞋具有减少关节扭矩和髌骨接触应力、强化足内在肌和跟腱力学特性等特点而再度流行起来,然而,跑者并没有意识到这不仅仅是穿着一双不同的跑鞋,而是下肢生物力学模式的转变。因此,本研究建议:如果跑者熟悉目前的跑姿且从未受过损伤,建议不要轻易更换跑鞋类型;如果跑者发生过运动损伤且(或)需要利用极简鞋增强足踝生物力学功能,考虑采用循序渐进的转化方式,且尽量配合下肢、足踝肌群的强化练习,如足核心训练。未来的研究应着重关注跑鞋与下肢损伤的内在生物力学机制,为减小和预防下肢损伤提供理论依据,并为跑者选择适合自身的跑鞋提供更具建设性的意见。

参考文献

[1] BRAMBLE D M, LIEBERMAN D E. Endurance running and the evolution of Homo[J]. Nature, 2004, 432(7015): 345-352.

[2] SUN X, LAM W K, ZHANG X, et al. Systematicreview of the role of footwear constructions in running biomechanics: Implications for running-related injury and performance[J]. Journal of sports science & medicine, 2020, 19(1): 20-37.

[3] 张力文,马云茹,朱晓兰,等. 跑鞋与着地方式对跑步损伤的影响[J]. 医用生物力学, 2018, 33(1): 76-81. (ZHANG Liwen, MA Yunru, ZHU Xiaolan, et al. The influence of running shoes and foot-strike patterns on running injuries[J]. Journal of medical biomechanics, 2018, 33(1): 76-81 (in Chinese)).

[4] 张燊,张希妮,崔科东,等. 足弓的运动功能进展及其在人体运动中的生物力学贡献[J]. 体育科学, 2018, 38(5): 73-79. (ZHANG Shen, ZHANG Xini, CUI Kedong, et al. The development of the longitude arch motor function and its biomechanical contribution to human movement[J]. China sport science, 2018, 38(5):

73-79(in Chinese)).

[5] LANGLEY B,CRAMP M,MORRISON S C. The influence of running shoes on inter-segmental foot kinematics[J]. Journal of foot & ankle surgery,2016,22(2):83-93.

[6] FISCHER K M,WILLWACHER S,TRUDEAU M B,et al. Effects of footwear design on rearfoot adduction in running[J]. Footwear science,2017,9(S1):116-118.

[7] KNAPIK J J,POPE R,ORR R,et al. Injuries and footwear (Part 1):Athletic shoe history and injuries in relation to foot arch height and training in boots[J]. Journal of special operations medicine,2015,15(4):102-108.

[8] DAVIS I S,HOLLANDER K,LIEBERMAN D E,et al. Stepping back to minimal footwear:Applications across the lifespan[J]. Exercise and sport sciences reviews,2021,49(4):228-243.

[9] 顾耀东,孙冬,FEKETE G,等."裸足"运动方式对下肢生物力学功能调整的研究进展[J]. 中国体育科技,2019,55(1):61-74.(GU Yaodong,SUN Dong,FEKETE G,et al. Review on the research of barefoot locomotion for alterations of lower extremity biomechanical functions[J]. China sport science and technology,2019,55(1):61-74(in Chinese)).

[10] PELTZ C D,HALADIK J A,HOFFMAN S E,et al. Effects of footwear on three-dimensional tibiotalar and subtalar joint motion during running[J]. Journal of biomechanics,2014,47(11):2647-2653.

[11] BONACCI J,SAUNDERS P U,HICKS A,et al. Running in a minimalist and lightweight shoe is not the same as running barefoot:A biomechanical study[J]. British journal of sports medicine,2013,47(6):387-392.

[12] RICE H,PATEL M. Manipulation of foot strike and footwear increases achilles tendon loading during running[J]. The American journal of sports medicine,2017,45(10):2411-2417.

[13] BAYLISS A J,WEATHERHOLT A M,CRANDALL T T,et al. Achilles tendon material properties are greater in the jump leg of jumping athletes[J]. Journal of musculoskeletal & neuronal interactions,2016,16(2):105-112.

[14] KUBO K,MIYAZAKI D,TANAKA S,et al. Relationship between Achilles tendon properties and foot strike patterns in long-distance runners[J]. Journal of sport science,2015,33(7):665-669.

[15] HISTEN K,ARNTSEN J,L'HEREUX L,et al. Achilles tendon properties of minimalist and traditionally shod runners[J]. Journal of sport rehabilitation,2017,26(2):159-164.

[16] LEBLANC M,FERKRANUS H. Lower extremity joint kinematics of shod,barefoot,and simulated barefoot treadmill running[J]. International journal of exercise science,2018,11(1):717-729.

[17] JOSEPH M F,HISTEN K,ARNTSEN J,et al. Achilles tendon adaptation during transition to a minimalist running style[J]. Journal of sport rehabilitation,2017,26(2):165-170.

[18] 杨宸灏,杨洋,张希妮,等. 不同极简指数跑鞋对髌股关节受力特征的影响[J]. 体育学刊,2020,27(1):132-138.(YANG Chenhao,YANG Yang,ZHANG Xini,et al. Effects of running shoes with different minimalist indexes on the biomechanical characteristics of the patellofemoral joint[J]. Journal of physical education,2020,27(1):132-138(in Chinese)).

[19] SHINOHARA J,GRIBBLE P A. Five-toed socks with grippers on the foot sole improve dynamic postural control in healthy individuals[J]. Medicine and science in sport and exercise,2010,42(5):496-498.

[20] SINCLAIR J,ATKINS S,TAYLOR P J. The effects of barefoot and shod running on limb and joint stiffness characteristics in recreational runners[J]. Journal of motor behavior,2016,48(1):79-85.

[21] HOLOWKA N B,WALLACE I J,LIEBERMAN D E. Foot strength and stiffness are related to footwear use in a comparison of minimally vs. conventionally-shod populations[J]. Scientific report,2018,8(1):1-12.

[22] SEBASTIAN W,JAN S,DIMITRIOS P,et al. Foot motion in children shoes:A comparison of barefoot walking with shod walking in conventional and flexible shoes[J]. Gait & posture,2008,27(1):51-59.

[23] JOE F. Show maker [M]. London:Simon & Schuster UK,2020.

[24] WANG B,YANG Y,ZHANG X,et al. Twelve-week gait retraining reduced patellofemoral joint stress during running in male recreational runners[J]. Biomed research international,2020(1):1-9.

[25] FULLER J T,BELLENGER C R,THEWLIS D,et al. The effect of footwear on running performance and running economy in distance runners[J]. Sports medicine,2015,45(3):411-422.

[26] ESCULIER J F,DUBOIS B,DIONNE C E,et al. A consensus definition and rating scale for minimalist shoes[J]. Journal of foot and ankle research,2015(8):42-50.

[27] SQUADRONE R,RODANO R,HAMILL J,et al. Acute effect of different minimalist shoes on foot strike pattern and kinematics in rearfoot strikers during running[J]. Journal of sport science,2015,33(11):1196-1204.

[28] RICE H M,JAMISON S T,DAVIS I S. Footwear matters:Influence of footwear and foot strike on load rates during running[J]. Medicine and science in sports and exercise,2016,48(12):2462-2468.

[29] LIEBERMAN D E,VENKADESAN M,WERBEL W A,et al. Foot strike patterns and collision forces in habitually barefoot versus shod runners[J]. Nature,2010,463(7280):531-535.

[30] LIEBERMAN D E,CASTILLO E R,OTAROLA-CASTILLO E,et al. Variation in foot strike patterns among habitually barefoot and shod runners in kenya[J]. Plos one,2015,10(7):e0131354.

[31] DAVIS I S,RICE H M,WEARING S C. Why forefoot striking in minimal shoes might positively change the course of running injuries[J]. Journal of sport and health science,2017,6(2):154-161.

[32] KNAPIK J J, TRONE D W, TCHANDJA J, et al. Injury-reduction effectiveness of prescribing running shoes on the basis of foot arch height: Summary of military investigations[J]. The journal of orthopaedic and sports physical therapy, 2014, 44(10): 805-812.

[33] RYAN M B, VALIANT G A, MCDONALD K, et al. The effect of three different levels of footwear stability on pain outcomes in women runners: A randomised control trial[J]. British journal of sports medicine, 2011, 45(9): 715-721.

[34] THEISEN D, MALISOUX L, GENIN J, et al. Influence of midsole hardness of standard cushioned shoes on running-related injury risk[J]. British journal of sports medicine, 2014, 48(5): 371-376.

[35] 张希妮, 邓力勤, 肖松林, 等. 不同鞋条件对后跟着地跑者跟腱负荷特征的影响[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 797-804. (ZHANG Xini, DENG Liqin, XIAO Songlin, et al. Effects of different shoe conditions on achilles tendon loading in runners with habitual rearfoot strike patterns[J]. Journal of medical biomechanics, 2021, 36(5): 797-804 (in Chinese)).

[36] CURTIS R, WILLEMS C, PAOLETTI P, et al. Daily activity in minimal footwear increases foot strength[J]. Scientific reports, 2021, 11(1): 18648.

[37] SALZLER M J, BLUMAN E M, NOONAN S, et al. Injuries observed in minimalist runners[J]. Foot & ankle international, 2012, 33(4): 262-266.

[38] RYAN M, ELASHI M, NEWSHAM-WEST R, et al. Examining injury risk and pain perception in runners using minimalist footwear[J]. British journal of sports medicine, 2014, 48(16): 1257-1262.

[39] 杨洋, 张希妮, 罗震, 等. 跑姿再训练对冲击力、下肢生物力学及刚度的影响[J]. 医用生物力学, 2020, 35(6): 665-671. (YANG Yang, ZHANG Xini, LUO Zhen. et al. Effects of gait retraining on impact forces, lower limb biomechanics and leg sriffness[J]. Journal of medical biomechanics, 2020, 35(6): 665-671 (in Chinese)).

[40] 王俊清, 张希妮, 罗震, 等. 步频再训练对跑步时下肢冲击的生物力学影响研究[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2167-2175. (WANG Junqing, ZHANG Xini, LUO Zhen, et al. The influence of cadence retraining on impact forces and lower extremity biomechanics during running[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(5): 2167-2175(in Chinese)).

[41] 张燊, 崔科东, 张希妮, 等. 足部功能训练对足趾肌力和足弓生物力学的影响[J]. 中国运动医学杂志, 2021, 40(4): 249-258. (ZHANG Shen, CUI Kedong, ZHANG Xini, et al. Effects of foot functional exercise on the toe flexor strength and the arch biomechanics[J]. Chinese journal of sports medicine, 2021, 40(4): 249-258(in Chinese)).

[42] RIDGE S T, OLSEN M T, BRUENING D A, et al. Walking in minimalist shoes is effective for strengthening foot muscles[J]. Medicine and science in sports and exercise, 2019, 51(1): 104-113.

(编辑　张璐)